特集報文:インフラ施設の耐震技術の高度化に向けて

杭列配置の違いが既設道路橋フーチングの 地震時損傷形態に与える影響に関する解析的検討

楊 勇·堀内智司·桐山孝晴

1. はじめに

近年、切迫性が指摘される南海トラフ地震、首 都直下型地震への対策として、予防力の向上と回 復力の向上という観点からインフラ施設の地震レ ジリエンス強化が必要である。特に地震直後にも 緊急輸送道路としての役割を果たす橋梁には、大 規模地震で被災した後も一定の機能を果たすこと が求められる。そのため、予防力の向上という観 点から、上部構造だけでなく基礎を含めた橋全体 系の耐震補強が必要であると考えられる。膨大な 数の既設道路橋基礎の耐震補強を効率よく行うた め、高精度な耐震性能の評価結果に基づき耐震補 強優先順位を決めることは、極めて重要である。

数が最も多い既設道路橋の杭基礎におけるフー チング部材に対しては、現行の道路橋示方書の規 定に従って耐震性能を評価する場合、特にレベル 2地震動に対して耐震性能不足となるケースが多 い。一方で、1995年兵庫県南部地震や2016年熊 本地震において発生した周辺地盤の側方変位によ る杭基礎の損傷・落橋被害及び特殊な杭配置を有 する杭基礎の被害事例を除いて、杭基礎における フーチング部材の損傷はほとんど確認されていな い。杭基礎におけるフーチング部材の耐震性能の 評価精度を向上させるためには、フーチング部材 の地震時損傷形態、メカニズムに関する知見を蓄 積し、実被害とのギャップを埋める取組みが必要 である。

本報では、杭基礎におけるフーチング部材を対 象に、杭列配置がフーチングの地震時損傷形態に 与える影響に着目して数値解析によって検討した 結果を報告する。なお、数値解析におけるモデル は、検討の容易さを考慮し、簡単なモデルを設定 したため、実橋の寸法・配筋などの諸元と完全に 対応しているわけではない。このため、数値解析 結果は、実橋の地震時挙動と異なる可能性がある ことに留意されたい。 2. フーチングの解析モデル

2.1 杭列配置の設定

杭列配置の違いがフーチングの地震時損傷形態 に与える影響を調べるため、図-1に示す杭列配置 パターンを設定した。S2-1は、基本モデルとし、 2×2の杭列とした。S2-2とS2-3には、両者とも 同じ杭本数(6本)としたが、異なる杭列配置と した。S2-4には、各辺に3本杭を配置し全部で8 本の杭とした。S2-5は、S2-4のフーチング中央 に1本杭を配置した。

2.2 寸法・配筋の詳細

過年度に実施したフーチング載荷実験¹⁾の供試 体の詳細を参考に、設定したフーチング・橋脚・ 杭の寸法と配筋を、基本モデルS2-1を例として それぞれ図-2と表-1に示す。配筋の様子を図-3に 示す。他のフーチングモデルの寸法や配筋はS2-1と同様とした。

フーチングの寸法は幅2500mm・奥行2600mm・ 高さ650mmである。また、橋脚の寸法は幅 600mm・奥行600mm・高さ1550mm、杭の寸法は、 杭径350mm・高さ300mmである。

主鉄筋の詳細については、フーチングの上面・ 下面にそれぞれD13-14本及びD19-26本(二方向 が同様)、橋脚及び杭断面にそれぞれD32-24本と D25-14本と設定した。せん断補強筋の詳細につ いては、フーチング、橋脚及び杭にそれぞれD16、 D19及びD13を用い、鉄筋の間隔を200mm、 50mm及び50mmと設定した。

2.3 解析方法

図・1に示すフーチングモデルの地震時損傷状態 を調べるため、汎用ソフトDIANA²⁾を用いて有 限要素法による数値解析を実施した。基本モデル S2-1の解析モデルを例として図・4に示す。

橋脚・フーチング・杭のコンクリート部分は、3 次元の立体形状を有するソリッド要素にてモデル 化した(要素サイズ50mm)。鉄筋部分は、DIANA の機能にある埋め込み鉄筋要素を用いて模擬した。 フーチングや杭のコンクリート部分の応力-ひ

Numerical Analysis of the Effect of Pile Arrangements on the Seismic Damage Patterns of Existing Bridge Footing

ずみ関係のモデル化については、圧縮側と引張側 にそれぞれ放物線型モデル³⁾とHordijkモデル⁴⁾を 用いた。モデルの詳細は関連文献^{3),4)}を参照され たい。また、鉄筋の応力-ひずみ関係は、バイリ ニアモデルとした。これらのコンクリートや鉄筋 の応力-ひずみ関係のモデルにおける各パラメー タの数値は、過年度に実施したフーチング載荷実 験¹⁾における材料試験結果に基づき設定した。な お、橋脚の損傷がフーチングよりも先に生じない ように、橋脚の塑性化を考慮せずに弾性体として 扱うことにした。

解析の実施順序については、載荷実験と同じ軸 カ(600kN、図・2参照)を導入してから、載荷実 験と同じ高さの位置に(フーチング上面より 1000mm)水平方向に強制変位を与えることによ り水平地震作用を模擬した。なお、解析モデルに おける境界条件は、杭底面の水平変位、鉛直変位 と回転を拘束した境界条件である。

3. 解析結果

3.1 水平荷重---水平変位の関係

上記の解析方法による異なる杭列配置を有する フーチングモデルの水平荷重一水平変位関係を図 -5に示す。同図に示す水平変位は、フーチング上 面より1000mmの位置に与える強制変位の大きさ を意味する。水平荷重は、強制変位を与えるため に必要となる荷重の大きさを意味する。

上面鉄筋の初降伏点は、杭本数が多くなるにつ れて水平変位が小さくなり、水平荷重が大きくな る傾向が見られる。最大荷重点は、各モデルの最 大荷重がほぼ同程度であったが、水平変位が大き く異なった。杭本数が最も多いモデルS2-5にお ける水平変位は、基本モデルS2-1の約半分と なった。その原因は、杭本数が多い場合、フーチ ングモデルの水平剛性(荷重一変位曲線の傾き) が大きくなることが考えられる。特に、初降伏点 以降には、杭本数の増加がフーチングモデルの水 平剛性に与える影響が顕著に現れる。

また、S2-2とS2-3の水平荷重一水平変位の関 係を比較すると、同じ杭本数(6本)を有するが、 両モデルの水平剛性が明らかに異なることがわか る。つまり、フーチングの地震時変形挙動は、杭 本数だけでなく杭列配置パターンにも依存すると 言える。



図-2 フーチングモデルの寸法(各モデル共通) 表-1 フーチングモデルの配筋(各モデル共通)

| | 主鉄筋 | せん断補強筋 |
|--------|--|-------------|
| フーチング | ・上面(二方向が同様) D13-14本 ・下面(二方向が同様) D19-26本 | D16 間隔200mm |
| 橋脚 | D32-24本 | D19 間隔50mm |
| 杭(1本分) | D25-14本 | D13 間隔50mm |



図-5 水平荷重-水平変位の関係



3.2 フーチングのたわみ

各フーチングモデルにおける最大荷重時のたわ み分布を、橋脚付け根位置の二つの断面(A-A'と B-B')を代表として図-6に示す。各ケースにおけ るフーチングのたわみ分布については、両断面と もに橋脚付け根付近のたわみが両端より大きく生 じた。各ケースにおけるフーチングの上面と下面 のたわみの大きさについては、両断面ともに橋脚 付け根付近のフーチング上面のたわみは、下面よ り大きいが、フーチング両端のたわみは、上面や 下面においてほぼ同程度であった。

杭本数の影響については、ケースS2-1~5にお いて杭本数の増加とともにフーチング上面や下面 のたわみが抑制された傾向が見られる。

また、S2-1とS2-2におけるフーチングたわみ を比較すると、S2-2の上面や下面ともに断面A-A' のほぼ全幅に渡ってフーチングたわみを大きく抑 制された一方で、断面B-B'においては上面や下面 ともに橋脚付け根付近のたわみは大きく抑制され たが、引抜側のB端においてS2-1とS2-2の結果が ほぼ同程度であった。更に、S2-1とS2-3におけ るフーチングたわみを比較すると、S2-3の断面 A-A'において上面や下面ともに橋脚付け根付近の たわみを大きく抑制されたが、AやA'端において S2-1とS2-3のたわみ結果がほぼ同程度であった。 一方で、S2-3において断面B-B'のB端(引抜側) まで上面や下面ともにたわみを抑制され、それは 同じ杭本数を有するS2-2と逆なたわみの抑制傾 向であった。つまり、フーチングのある断面のた わみは、杭本数だけでなく杭列配置とも関係する。 載荷方向と平行する辺の中央に杭を配置する場合 (S2-2)、載荷方向と直交する断面の端部までた わみを有効に抑制できる。同様に、載荷方向と直 交する辺の中央に杭を配置する場合(S2-3)、載 荷方向と平行する断面の端部までたわみを有効に 抑制できる。

フーチングの四辺の中央に杭を配置したS2-4 のたわみは、S2-1と比べて載荷方向と直交する 断面だけでなく、載荷方向と平行する断面のたわ みも大きく抑制された。フーチング中央に杭を配 置するS2-5においては、S2-4と比べて断面A-A' とB-B'ともに橋脚付けのたわみをやや抑制された。

3.3 フーチングの上面鉄筋の降伏状態

古い基準に基づき設計された既設フーチングは、 当時の設計地震荷重が小さいため、現行の道路橋 示方書の規定が満足できず、上面の損傷が発生し、 耐震性能不足となるケースが多い。ここに、図-7 に示す最大荷重点における二方向の上面鉄筋の降 伏状態に着目し、杭列配置の違いがフーチングの 地震時損傷形態に与える影響を分析する。

基本ケースS2-1における上面鉄筋の降伏状態 は、曲げ照査断面付近の載荷方向と平行する鉄筋 だけでなく、載荷方向と直交する鉄筋も降伏し、 放射線状な降伏範囲が生じたことが分かる。過去 のフーチング載荷実験⁵⁾においても、図-8に示す ような放射線状なひび割れ分布が観察された。解 析より求めたS2-1の破壊パターン結果は、既往 の実験結果とある程度対応していると言える。

杭本数の影響については、ケースS2-1~5にお いて杭本数の増加とともに上面鉄筋の降伏範囲が 抑制された傾向が見られる。

また、S2-1とS2-2のフーチング上面鉄筋の降 伏範囲を比較すると、S2-2において曲げ照査断 面付近の載荷方向と平行する鉄筋の降伏範囲は明 らかに小さくなり、殆ど奥行幅の中央に集中して いる。それは、S2-2における多く配置した杭3 と杭4の付近にフーチングのたわみを大きく抑制 されたと考えられる。杭本数が同じで杭列配置が 異なるS2-3においても、フーチング上面鉄筋の 降伏範囲の抑制傾向が同様に確認できる。ただし、 S2-3における上面鉄筋降伏範囲を大きく抑制さ れたのは、杭2付近の載荷方向と直交する鉄筋と なり、S2-2と異なった。これらの結果から、 フーチング上面鉄筋の降伏範囲は杭本数だけでな く杭列配置とも関係することがわかる。

フーチングの四辺の中央に杭を配置したS2-4



図-7 二方向の上面鉄筋の降伏範囲(最大荷重点)



図-8 フーチング上面ひび割れ分布の例5)

の上面鉄筋の降伏範囲は、S2-1と比べて二方向 鉄筋とも抑制された。フーチング中央に杭を配置 するS2-5においては、S2-4と比べて上面鉄筋の 降伏範囲を更に抑制され殆ど杭5の付近となった。

4. まとめ

本報では、異なる杭列配置を有したフーチング モデルを用い、杭列配置の違いがフーチングの地 震時挙動に与える影響を数値解析により調べた。 杭本数が多くなるとともにフーチングのたわみや 上面鉄筋の降伏範囲の大きさが抑制される傾向が 確認できた。また、フーチングのたわみや上面鉄 筋の降伏範囲の分布は、杭列配置パターンにより 大きく変化することも確認できた。

今後、数値解析に対する実験的検証や、実橋の 寸法・配筋などの諸元を想定した上で実験や解析 的検討を行い、予防力の向上という観点から、既 設フーチングの耐震補強に関する知見を提供した い。

参考文献

- 土木研究所:アルカリシリカ反応による損傷を受けたフーチングに対する損傷度評価および補修・ 補強方法に関する研究、土木研究所資料第4304号、 2015
- TNO DIANA BV: DIANA User's Manual (https://dianafea.com/manuals/d102/Diana.html) TNO DIANA BV: Delft, The Netherlands, 2018.
- Feenstra, P.: Computational aspects of biaxial stress in plain and reinforced concrete, PhD Dissertation, Delft University of Technology, 1993
- Hordijk, D.: Local approach to fatigue of concrete, PhD Dissertation, Delft University of Technology, 1991
- 5) 土木研究所:上面側が主鉄筋となる場合のフーチ ングの耐力算定法に関する実験的研究、土木研究 所資料第3781 号、2001



土木研究所構造物メンテナンス 研究センター橋梁構造研究グ ループ 専門研究員 博士 (工学) Dr.Yong YANG

堀内智司



土木研究所構造物メンテナンス 研究センター橋梁構造研究グ ループ 主任研究員 HORIUCHI Satoshi



土木研究所構造物メンテナンス 研究センター耐震研究監 KIRIYAMA Takaharu